

①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Offenlegungsschrift
⑪ DE 3609541 A1

⑤1 Int. Cl. 4:
F15D 1/12
B 64 C 21/02

②1 Aktenzeichen: P 36 09 541.9
②2 Anmeldetag: 21. 3. 86
④3 Offenlegungstag: 24. 9. 87

Behördenstempel

DE 3609541 A1

⑦1 Anmelder:

Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft-
und Raumfahrt eV, 5300 Bonn, DE

⑦4 Vertreter:

Bibrach, R., Dipl.-Ing.; Rehberg, E., Dipl.-Ing.,
Pat.-Anw.; Bibrach-Brandis, M., Rechtsanwalt, 3400
Göttingen

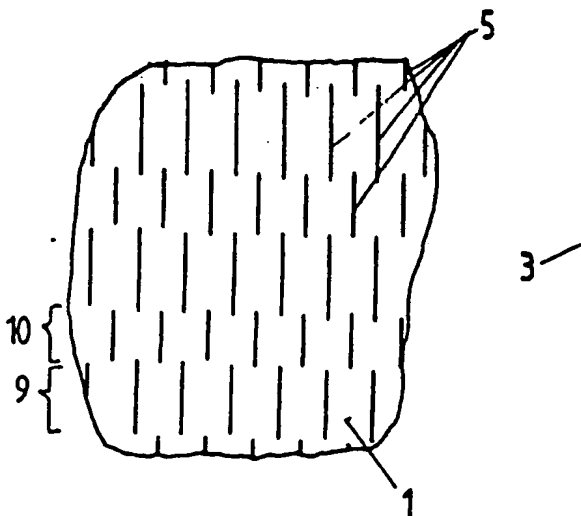
⑦2 Erfinder:

Bechert, Dietrich W. Dr., 1000 Berlin, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Verminderten Strömungswiderstand durch herabgesetzte Wandschubspannung aufweisende Oberfläche eines turbulent überströmten Körpers

Die Oberfläche eines turbulent überströmten Körpers weist verminderten Strömungswiderstand durch herabgesetzte Wandschubspannung auf. Er besitzt in Strömungsrichtung verlaufende Rillen, die durch scharfkantig ausgebildete Rippen (5) voneinander getrennt sind. Die Rippen (5) sind in einer Vielzahl von Staffeln (9, 10 usw.) vorgesehen. Jede Rippen-Staffel (9, 10) besteht aus einer Vielzahl quer oder schräg zur Strömungsrichtung nebeneinander im Abstand angeordneter Rippen (5). Die Rippen in Strömungsrichtung (3) aufeinanderfolgender Rippen-Staffeln (9, 10) sind seitlich zur Strömungsrichtung gegeneinander versetzt angeordnet. Die Rippen der einzelnen Rippen-Staffeln weisen kurze Erstreckungen in Strömungsrichtung (3) auf.



DE 3609541 A1

Patentansprüche

1. Verminderten Strömungswiderstand durch herabgesetzte Wandschubspannung aufweisende Oberfläche eines turbulent überströmten Körpers, mit in Strömungsrichtung verlaufenden Rillen, die durch scharfkantig ausgebildete Rippen voneinander getrennt sind, dadurch gekennzeichnet, daß die Rippen (5) in einer Vielzahl von Staffeln (9, 10 usw.) vorgesehen sind, daß jede Rippen-Staffel (9, 10 usw.) aus einer Vielzahl quer oder schräg zur Strömungsrichtung nebeneinander im Abstand s angeordneter Rippen (5) besteht, daß die Rippen in Strömungsrichtung aufeinanderfolgender Rippen-Staffeln (9, 10 usw.) seitlich zur Strömungsrichtung gegeneinander versetzt angeordnet sind, und daß die Rippen der einzelnen Rippen-Staffeln kurze Erstreckungen in Strömungsrichtung (3) aufweisen.
2. Oberfläche nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Rippen (5) in Strömungsrichtung (3) aufeinanderfolgender Rippen-Staffeln (9, 10 usw.) um eine halbe Teilung gegeneinander versetzt angeordnet sind.
3. Oberfläche nach Anspruch 1 und 2, dadurch gekennzeichnet, daß die entgegengesetzt zur Strömungsrichtung (3) angeordneten Enden der Rippen (5) abgeschrägt oder abgerundet ausgebildet sind.
4. Oberfläche nach Anspruch 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß der dimensionslose Abstand s^+ der Rippen (5) voneinander in einer Rippen-Staffel (9) in der Größenordnung $s^+ = 10 \dots 45$ liegt.
5. Oberfläche nach Anspruch 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Erstreckung der Rippen (5) der einzelnen Rippen-Staffeln (9, 10 usw.) in Strömungsrichtung (3) etwa 1 bis 6 Rillenbreiten entspricht.

Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf einen verminderten Strömungswiderstand durch herabgesetzte Wandschubspannung aufweisende Oberfläche eines turbulent überströmten Körpers, mit in Strömungsrichtung verlaufenden Rillen, die durch scharfkantig ausgebildete Rippen voneinander getrennt sind. Diese feinen Rippen vermindern den Strömungswiderstand bei turbulenter Strömung an der Oberfläche. Die Widerstandsverminderung wird durch Herabsetzung der turbulenten Wandschubspannung erreicht.

Eine Oberfläche der eingangs beschriebenen Art ist aus Walsh, M. J.: Turbulent boundary layer drag reduction using riblets, AIAA-Paper 82-0169 (1982) bekannt. Die dabei eingesetzten widerstandsvermindernden Rippen erstrecken sich jedoch über eine sehr große Länge in Strömungsrichtung. Sofern die Rippen in geeignetem gegenseitigen Abstand und mit scharfkantiger Form ihrer Oberkante ausgebildet werden, ist es möglich, hierdurch eine Verminderung der turbulenten Wandschubspannung von ca. 7 bis 8% zu erreichen.

Gemäß einer früheren Anmeldung (P 34 41 554.8-53) ist bereits vorgeschlagen worden, die Oberfläche aus einer Vielzahl von Einzelelementen zusammenzusetzen, die auf ihrer der Strömung zugekehrten Seite Rippen und Rillen aufweisen. Dabei sind die Einzelelemente relativ zueinander so angeordnet und/oder ausgebildet, daß auf der der Strömung zugekehrten Seite Schlitze entstehen. Die Schlitze sind durch unterhalb der der Strömung zugekehrten Oberfläche der Einzelelemente

angeordnete Kanäle miteinander verbunden. Die Einzelelemente sind so angeordnet, daß die Rillen und Rippen der verschiedenen Elemente in Strömungsrichtung hintereinander miteinander fluchten.

- 5 Weiterhin ist es aus Kline, S. J./Reynolds, W. C., Schraub, F. A./Runstadler, P. W.: The structure of turbulent boundary layers, J. Fluid Mech, 30, 4, (1967), S. 741—773 bekannt, daß sich in der wandnahen Schicht einer turbulenten Grenzschicht Streifen geringer Strömungsgeschwindigkeit ("langsame Streifen" = "low speed streaks") bilden, die sich in Strömungsrichtung erstrecken (s. Fig. 1). Diese sind auf langsam rotierende Längswirbel zurückzuführen, die stark abgebremstes Fluid von der Wand in die Strömung transportieren. Die Längswirbel sind in Jang, P. S./Benney, D. J./Gran, R. L.: On the origin of streamwise vortices in an turbulent boundary layer, Report DT-8154-06 (1985), Dynamics Technology Inc., 21311 Hawthorne Blvd., Torrance, California 90503, USA, als eine Strömungsresonanz der wandnahen Schicht erklärt worden. Die Wellenlänge λ_z quer zur Strömungsrichtung entspricht dem doppelten Abstand der einzelnen gegenläufigen Längswirbel (s. Fig. 1). Diese Längswirbel haben auch eine Wellenlänge λ_x in Strömungsrichtung, die jedoch erheblich größer als der seitliche Wirbelabstand ist. Die typischen Dimensionen sind $\lambda_z^+ \approx 90$ und $\lambda_x^+ \cdot \lambda_z^+$ ist eine dimensionslose Länge, mit der Definition

$$\lambda^+ = \frac{\lambda \cdot \sqrt{\tau_0 / \rho}}{\nu}$$

Dabei ist τ_0 die Wandschubspannung der ungestörten turbulenten Grenzschichtströmung über einer glatten Platte, ρ ist die Dichte des Fluids und ν die kinematische Zähigkeit. Nach einigen Experimenten liegt λ_z^+ möglicherweise noch höher als die angegebenen Werte.

Die Wirkung der Längsrippen beruht darauf, daß die Strömung der Längswirbel quer zur Hauptströmungsrichtung behindert wird. Als Folge werden die "langsamen Streifen" weniger intensiv, die Strömung bleibt stabiler und der Turbulenzgrad nimmt ab (Hooshmand, D./Youngs, R./Wallace, J. M.: An experimental study of changes in the structure of a turbulent boundary layer due to surface geometry changes, AIAA-Paper 83-0230 (1983)). Insgesamt führt dies zu einer Verringerung der turbulenten Wandschubspannung, die bekanntlich auf dem Impulsaustausch der turbulenten Strömung beruht. Die Längsrippen wirken aber nur optimal, wenn sie sehr scharfkantig sind und wenn ihr seitlicher Abstand in der Größenordnung des halben Längswirbelabstandes oder darunter liegt. Damit ergibt sich ein Rippenabstand s , der um $s^+ \approx \lambda_z^+ / 4 \approx 22$ oder darunter liegen sollte. In der Tat zeigen auch alle Messungen mit Rippenoberflächen, die eine Widerstandsverminderung erbracht haben, etwa diese Dimension des Rippenabstandes (Walsh, M. J.: Turbulent boundary layer drag reduction using riblets, AIAA-Paper 82-0169 (1982)). Dieser Rippenabstand ist meist sehr klein und liegt z. B. für eine Anwendung an einem Verkehrsflugzeug bei ca. 0,05 mm.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Oberfläche der eingangs beschriebenen Art derart weiterzubilden, daß der Strömungswiderstand bei turbulenter Überströmung noch weiter herabgesetzt wird. Darüberhinaus muß diese Oberflächenform so ausgebildet sein, daß sich die Oberfläche auch vergleichsweise einfach fertigen läßt.

Erfindungsgemäß wird dies dadurch erreicht, daß die Rippen in einer Vielzahl von Staffeln vorgesehen sind,

daß jede Rippen-Staffel aus einer Vielzahl quer oder schräg zur Strömungsrichtung nebeneinander im Abstand angeordneter Rippen besteht, daß die Rippen in Strömungsrichtung aufeinanderfolgender Rippen-Staffeln seitlich zur Strömungsrichtung gegeneinander versetzt angeordnet sind, und daß die Rippen der einzelnen Rippen-Staffeln kurze Erstreckungen in Strömungsrichtung aufweisen. Im allgemeinen sind die einzelnen Rippen jeder Rippen-Staffel auch gleichlang; dies muß jedoch nicht so sein. Wesentliches Merkmal ist die gestaffelte Anordnung der Rippen, also die Anordnung mehrerer Rippen-Staffeln, die jeweils von Staffel zu Staffel in Strömungsrichtung gegeneinander versetzt angeordnet sind. Selbstverständlich müssen die Rippen scharfkantig ausgebildet sein und die geometrischen Bedingungen, wie sie nachfolgend noch erläutert werden, müssen eingehalten werden.

Die Behinderung der Querströmung der Längswirbel hängt auch davon ab, wie weit die Rippen senkrecht zur Wand in die Strömung hineinragen. Dieses Hineinragen kann aber, wie eigene Rechnungen und Messungen gezeigt haben, nicht beliebig dadurch gesteigert werden, daß die Rippen höher gemacht werden. Die maßgebende Eindringtiefe ist durch den Abstand zwischen Rippenoberkante und dem "virtuellen Nullpunkt" der zähen wandnahen Strömung gegeben. Der virtuelle Nullpunkt ist so definiert: Ersetzt man die gerippte Oberfläche durch eine glatte Oberfläche in der Höhe des virtuellen Nullpunkts, so ergibt sich über der glatten Oberfläche die gleiche mittlere zähe Strömung wie etwas oberhalb der Rippen der gerippten Oberfläche. Der virtuelle Nullpunkt befindet sich naturgemäß zwischen der Rippenoberkante und dem Rillenboden zwischen den Rippen. Der virtuelle Nullpunkt läßt sich auch als der Schwerpunkt der Schubspannung an der gerippten Oberfläche auffassen. Als "Eindringtiefe" d wird der Höhenunterschied zwischen Rippenoberkante und virtuellem Nullpunkt bezeichnet. Die Eindringtiefe d der Rippen ist für die Beeinflussung der Längswirbel-Querströmung die maßgebliche Größe.

Die Berechnung der zähen Strömung um lange Rippen zeigt, daß die Eindringtiefe d nicht über 22,1% des Rippenabstandes s gesteigert werden kann. Der angegebene Grenzwert

$$0,221 = \frac{\ln 2}{\pi}$$

wurde sowohl analytisch ermittelt als auch experimentell überprüft. Dieser Grenzwert kann nicht durch hohe Rippen oder irgendwelche Formvarianten der langen Rippen verändert werden. Aus diesem Grenzwert errechnet sich mit den vorherigen Überlegungen (also $s^+ \approx 22$) eine dimensionslose Eindringtiefe von maximal $d^+ \approx 5$. Dieses begrenzt die Einflußmöglichkeit auf eine solche Längswirbelströmung, deren Wirbelkerne wesentlich höher über der Oberfläche liegen, nämlich etwa bei einer dimensionslosen Höhe von $y^+ \approx 35$. Damit erklärt sich auch die Begrenzung auf die bisher erzielte Widerstandsverminderung.

Die einzige Möglichkeit, die Eindringtiefe und damit die Widerstandsverminderung zu vergrößern, ist eine radikale Abkehr von langen Rippen. Die einzelnen Rippen bzw. Rippen-Staffeln müssen in Strömungsrichtung kurz ausgebildet sein und es ist ein seitlicher Versatz von Rippen-Staffeln zu in Strömungsrichtung nachfolgender Rippen-Staffeln erforderlich. Durch diesen Versatz können die Rippen effektiv vergleichsweise doppelt

soweit seitlich auseinandergerückt werden. Man erhält die doppelte Eindringtiefe. Andererseits ist die versetzte Anordnung der Rippen auch geeignet, die Ausbildung von Längswirbeln zu verhindern, wenn die Rippen und der nachfolgende Zwischenraum kürzer als die Wellenlänge in Strömungsrichtung λ_s sind.

Besonders vorteilhaft ist es, wenn die Rippen in Strömungsrichtung aufeinanderfolgender Rippen-Staffeln um eine halbe Teilung gegeneinander versetzt angeordnet sind, so daß auf eine Rille zwischen zwei Rippen einer Rippen-Staffel in Strömungsrichtung eine Rippe und umgekehrt folgt. Die Rippen können rechteckig begrenzt sein, wobei sich die Eindringtiefe etwa verdoppelt. Es ist aber auch möglich, daß die entgegengesetzt zur Strömungsrichtung ausgerichteten Enden der Rippen abgeschrägt oder abgerundet ausgebildet sind. Die Eintrittskanten der Rippen sind also abgeschrägt oder abgerundet. Eine solche kreisabschnitt- oder flossenförmige Rippenstruktur erscheint strömungsmechanisch noch günstiger und ermöglicht noch höhere Eindringtiefen. Damit ist es möglich, die 8%-Grenzen der Widerstandsverminderung aus dem Stand der Technik noch weiter zu unterschreiten.

Der Fachmann würde vermuten, daß die Aufteilung einer Rippe in eine Vielzahl von gestaffelten Rippen unausweichlich eine Widerstandserhöhung bringen würde. In einer normalen Parallelströmung mit konstanter Geschwindigkeit wäre das auch der Fall. In einer viskosen wandnahen Strömung läßt sich jedoch schon mit einer relativ einfachen Rechnung zeigen, daß hier kein ungünstiger Effekt auftritt. Technologisch bleiben die Vorteile bisheriger Rillenoberflächen erhalten.

Der dimensionslose Abstand der Rippen voneinander in einer Rippen-Staffel sollte in einer Größenordnung von etwa $s^+ = 10 \dots 45$ liegen. In einer typischen Anwendung bei einem Verkehrsflugzeug würde damit der Rippenabstand ca. 0,1 mm betragen.

Die Erstreckung der Rippen der einzelnen Rippen-Staffeln in Strömungsrichtung entspricht etwa ein bis sechs Rillenbreiten. Die gestaffelten Rippen können auch verschiedene Längen aufweisen und sie können sich auch teilweise überlappen. Auch eine schräge Anordnung zur Strömungsrichtung der Rippen bzw. Rippen-Staffeln ist möglich, wobei die einzelne Rippe aber in Strömungsrichtung angeordnet sein muß. Die Rippen lassen sich sämtlich relativ einfach durch Warmwalzen oder Gießen von Plastikfolien herstellen. Solche Plastikfolien können dann auf die Oberfläche z. B. eines Flugzeugs aufgeklebt werden.

Weiterhin ist es möglich, die erfindungsgemäße gestaffelte Anordnung der Rippen mit anderen bekannten widerstandsvermindernden Maßnahmen zu kombinieren. Beispielsweise ist eine Kombination mit unter der Oberfläche verbundenen Schlitzen möglich, deren Austrittsöffnungen in Strömungsrichtung weisen. Weiterhin ist die Kombination mit in die turbulente Grenzschicht eingebrachten Gleichrichtungs-Flügeln gemäß Anders, J. B./Watson, R. D.: Airfoil large-eddy breakup devices for turbulent drag reduction, AIAA-Paper 85-0520 (1985) möglich, die ebenfalls für sich und in der Kombination dann zu einer verstärkten Verminderung der turbulenten Wandschubspannung führen.

Verschiedene Ausführungsbeispiele und Darstellungen zur Verdeutlichung der Erfindung sind in den Zeichnungen dargestellt und werden im Folgenden beschrieben. Es zeigen:

Fig. 1 die Darstellung von Streifen geringerer Strömungsgeschwindigkeit in einer wandnahen Schicht in-

folge Auftretens von Längswirbeln.

Fig. 2 die Verdeutlichung einiger geometrischer Größen,

Fig. 3 eine erste Ausführungsform der erfindungsgemäßen Oberfläche mit gestaffelt angeordneten Rippen,

Fig. 4 eine weitere Ausführungsform mit gestaffelten Rippen in Kreisabschnittform,

Fig. 5 eine weitere Ausführungsform der Oberfläche mit gestaffelten Rippen in Flossenform,

Fig. 6 eine Draufsicht auf eine weitere Ausführungsform der Oberfläche mit unterschiedlich langen Rippen-Staffeln,

Fig. 7 eine Ausführungsform mit relativ großer Überlappung der Rippen-Staffeln,

Fig. 8 eine weitere Ausführungsform der Rippen-Staffeln und

Fig. 9 eine letzte Ausführungsform der Rippen-Staffeln mit Schräganordnung.

In Fig. 1 ist die aus dem Stand der Technik bekannte Tatsache dargestellt, daß sich über einer Oberfläche (1) einer Platte (2) in Strömungsrichtung (3) in der wandnahen Schicht einer turbulenten Grenzschicht Streifen geringerer Strömungsgeschwindigkeit ausbilden. Es handelt sich hierbei um langsam rotierende Längswirbel (4), die gegenläufig rotieren und stark abgebremstes Fluid von der Oberfläche (1) in die Strömung transportieren. Die Wellenlänge λ_z quer zur Strömungsrichtung entspricht dem doppelten Abstand der einzelnen gegenläufigen Längswirbel (4). Die Längswirbel (4) haben auch eine Wellenlänge λ_x in Strömungsrichtung, die jedoch erheblich größer ist als der seitliche Wirbelabstand.

In Fig. 2 ist in starker Vergrößerung ein Teil einer Rippen-Staffel der erfindungsgemäßen Oberfläche dargestellt, um einige Größen zu verdeutlichen. Von der Oberfläche (1) ragen einzelne Rippen (5), die der Strömung zugekehrt durch scharfe Kanten (6) begrenzt sind, parallel zueinander ausgerichtet und parallel zur Strömungsrichtung angeordnet vor. Es ist nicht schädlich, wenn die Rippen (5) am Fuß, d. h. an der Übergangsstelle zu der Oberfläche (1) abgerundet ausgebildet sind. Die Rippen (5) besitzen eine relativ kurze Erstreckung parallel zur Strömungsrichtung. Der Rippenabstand s ist die Entfernung zweier, in einer Rippen-Staffel benachbarter Rippen (5), gemessen quer zur Strömungsrichtung. Es ist außerdem der virtuelle Nullpunkt (7) der zähen wandnahen Strömung eingezeichnet. Dieser virtuelle Nullpunkt (7) liegt in einer Eindringtiefe d von der Ebene der Kanten (6) in Richtung auf die Oberfläche (1). Es sind zwei Geschwindigkeitsprofile dargestellt, und zwar an der Stelle der Rippe (5) und einer dazwischenliegenden Rille (8). Die Geschwindigkeitsverteilungen sind als zeitliche Mittelwerte zu verstehen.

Fig. 3 zeigt eine erste Ausbildungsform der Oberfläche (1) mit den Rippen (5), die hier Rechteckform besitzen. Die ersten quer zur Strömungsrichtung (3) angeordneten Rippen (5) bilden eine Rippen-Staffel (9). Die in Strömungsrichtung (3) nachfolgenden Rippen (5) bilden eine Rippen-Staffel (10) usw. Es ist ersichtlich, daß die in Strömungsrichtung (3) aufeinanderfolgenden Rippen-Staffeln (9, 10 usw.) jeweils seitlich gegeneinander versetzt angeordnet sind, insbesondere um eine halbe Teilung.

Fig. 4 zeigt eine weitere Darstellung in perspektivischer Ansicht. Auch hier ergänzen quer zur Strömungsrichtung nebeneinander angeordnete Rippen (5) sich zu den verschiedenen Rippen-Staffeln (9, 10 usw.). Die einzelnen Rippen bestehen hier aus einer Kreisabschnittform, sind also abgerundet ausgebildet.

Fig. 5 zeigt die Anordnung von Rippen (5) in Flossenform, wobei jede Rippe (5) auf ihrer der Strömung zugekehrten Seite mit geringer Höhe beginnt. Auch hier ist der seitliche Versatz der Rippen gegeneinander ersichtlich.

Wie Fig. 6 zu erkennen gibt, die eine Draufsicht auf eine weitere Ausführungsform zeigt, müssen die einzelnen Rippen (5) der Rippen-Staffeln (9, 10 usw.) nicht unbedingt gleich lang ausgebildet sein. Die Rippen (5) je einer Rippen-Staffel sind untereinander gleich lang. Die Rippen unterschiedlicher Rippen-Staffeln können jedoch durchaus unterschiedliche Länge aufweisen. Es ist auch möglich, wie in Fig. 7 dargestellt, daß sich die einzelnen Rippen (5) der verschiedenen Rippen-Staffeln (9, 10 usw.) überlappen. Die Rippen-Staffeln (9, 10 usw.) sind hier quer zur Strömungsrichtung (3) ausgerichtet angeordnet.

Die Ausführungsbeispiele der Fig. 8 und 9 zeigen schräg zur Strömungsrichtung (3) gestaffelte Rippen (5), wobei die Rippen (5) gemäß Figur (8) die dargestellte Form aufweisen können, also vorn und hinten zugespitzt sind. Selbstverständlich weisen die Rippen (5) bei allen Ausführungsbeispielen die anhand von Fig. 2 verdeutlichten scharfen Kanten (6) auf, und zwar an ihrem in die Strömung hineinragenden Ende. Bei allen bisher dargestellten Ausführungsformen sind die Rippen in Strömungsrichtung aufeinanderfolgender Rippen-Staffeln (9, 10 usw.) um eine halbe Teilung gegeneinander versetzt. Fig. 9 zeigt eine Ausführungsform mit schräg gestaffelten Rippen, bei denen der seitliche Versatz nicht unbedingt eine halbe Teilung betragen muß. Der Versatz kann hier im Verhältnis $1/3 - 2/3$ aufgeteilt sein. Auch muß die Länge der Rippen in einer Rippen-Staffel nicht unbedingt konstant sein.

Bezugszeichenliste:

- 1 = Oberfläche
- 2 = Platte
- 3 = Strömungsrichtung
- 4 = Längswirbel
- 5 = Rippe
- 6 = Kante
- 7 = virtueller Nullpunkt
- 8 = Rille
- 9 = Rippen-Staffel
- 10 = Rippen-Staffel

2103

Nummer:
Int. Cl.4:
Anmeldetag:
Offenlegungstag:

36 09 541
F 15 D 1/12
21. März 1986
24. September 1987

1/4

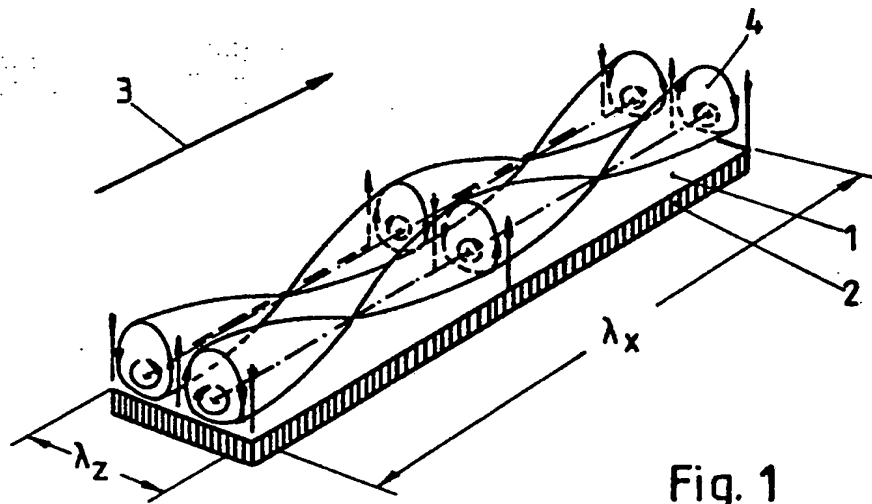


Fig. 1

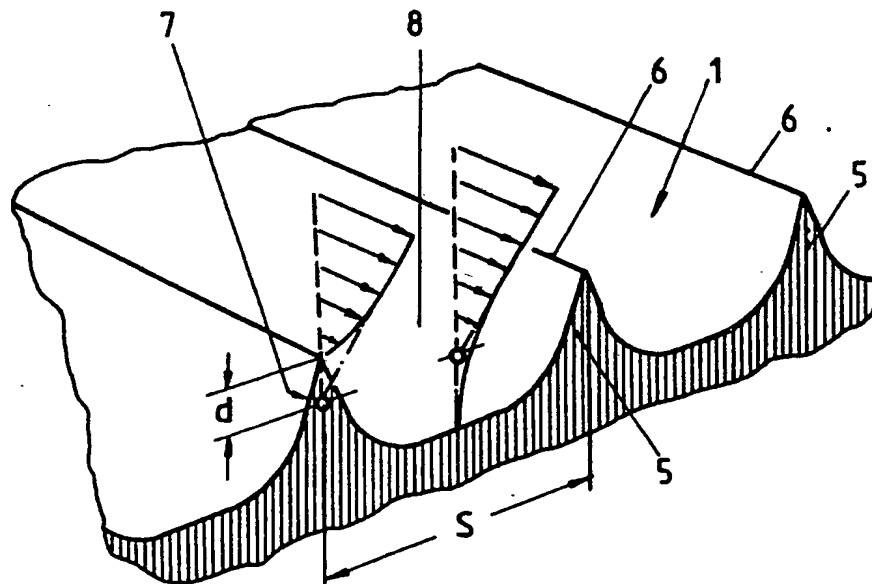


Fig. 2

ORIGINAL INSPECTED

2/4

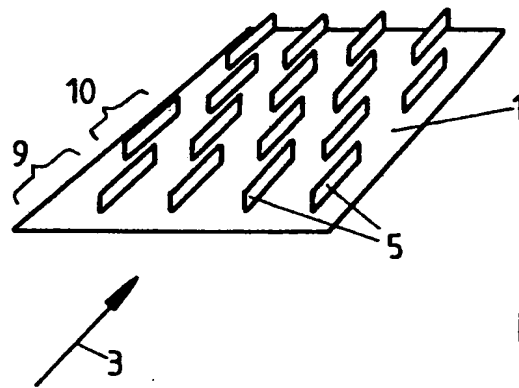


Fig. 3

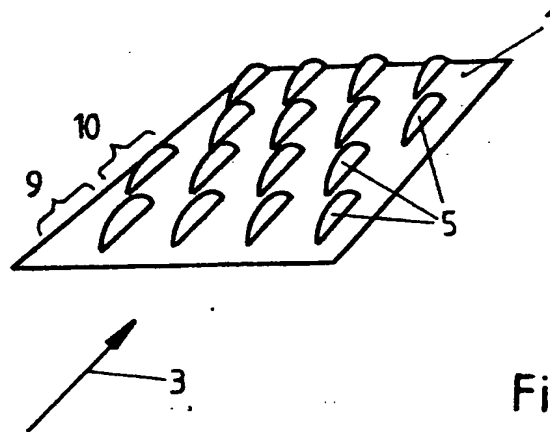


Fig. 4

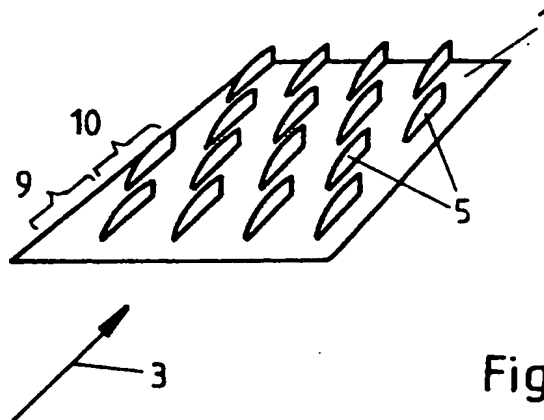


Fig. 5

3/4

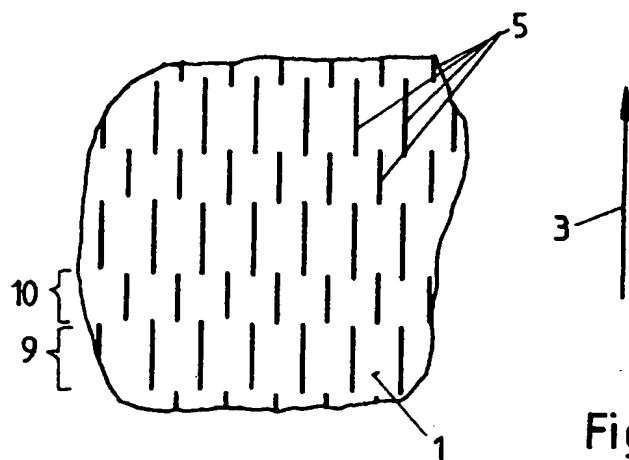


Fig. 6

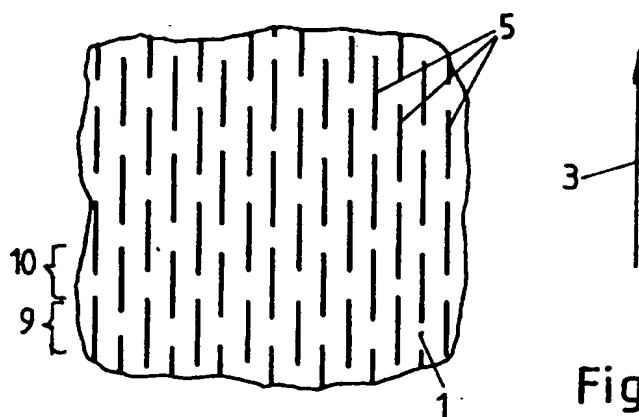


Fig. 7

4/4

